

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360165

研究課題名(和文)ピコリットル液量制御30GHz帯域MEMS可変キャパシタの研究

研究課題名(英文)30 GHz MEMS varibale capacitor utilizing pico-liter droplet

研究代表者

鈴木 健一郎(SUZUKI, KENICHIRO)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：70388122

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,100,000円、(間接経費) 4,530,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、広帯域可変RF-MEMSフィルタへの応用を目的に、可変キャパシタ内に純水を搬送して誘電率を80倍も可変できるという原理を利用した新デバイス機構の研究開発を目的としている。本研究期間中に、0.1nLの液滴を10 $\mu$ mの狭いギャップ中で搬送させることに成功した。また、1-6 GHz帯域に中心周波数をもつ可変帯域除去フィルタ(BEF)をこの可変キャパシタを利用して作製した。この可変BEFデバイスは、20 $\mu$ mという狭いギャップ中の水の搬送、10 GHzの高周波数において水を使用した可変キャパシタが正常に動作することを初めて実証したこと、実証的な応用実証に成功したこと、において革新的である。

研究成果の概要(英文)：The research on a novel principle utilizing the change of 80 in the permittivity in a capacitor with pure water is objective in this research. During the research, 0.1 nL water droplet could be transported in a 10  $\mu$ m gap. By using this varibale capacitor, a band elimination filter (BEF) for the operation of 1-6 GHz was fabricated. Note that it was indicated that water droplet in a 10  $\mu$ m gap could be transported, variable capacitor with water could be operated in 10 GHz, and the result could be adopted to a real filter by the success in the varibale BEF.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：RF-MEMS 可変キャパシタ 液滴搬送 EWOD フィルタ 表面張力 空間二重層 BEF

## 1. 研究開始当初の背景

現在広く普及している RF フィルタ回路は、インダクタ(L)とキャパシタ(C)から構成されており、Cを変化させることによりフィルタの周波数特性を変化させることができる。半導体の可変ダイオードキャパシタ(バリキャップ)は約3倍程度の静電容量変化率(CCR)をもっているため、これを利用して約2倍程度の周波数可変率をもつフィルタ回路を実現することができる。しかし、近年の通信技術の急激なワイドバンド化の傾向はさらに大きな周波数可変機能をもつフィルタを強く要求している。現在、MEMS (Microelectromechanical Systems)技術を利用して大きな静電容量可変率をもつキャパシタを開発する研究が世界中で積極的になされている。いままで、キャパシタのギャップを変化させることによって可変率7をもつ Al / AlN 複合薄膜キャパシタ[1]と本提案者と共同研究者による可変率10をもつ三層構造 MEMS 静電キャパシタの報告がなされている[2]。しかし、フィルタのカットオフ周波数は C に逆比例する関係にあるため、この世界最大の可変率をもつ MEMS キャパシタを利用してもフィルタのカットオフ周波数を約3倍程度変化させることができるだけであり、現今の急速なブロードバンド化技術の要求に十分に伝えることができないという現状がある。

静電容量はよく知られているように以下の式で表される。

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r A / d,$$

ここで、 $A$ 、 $d$  は電極面積とギャップであり、比誘電率  $\epsilon_r$  はキャパシタ内部の物質の分極特性に依存した値である。従来の技術は式中のギャップ  $d$  を変化させて  $C$  を変化させるというものであったが、本提案者はこの式の比誘電率を変化させるとキャパシタの静電容量が大きく変化することに注目した。純水を用いた実験を行い、水を充填する流路の数を変化させることによって1個の静電容量が80倍も大きく変化することを4 GHz までの周波数帯域で実験的に確かめた。また、13本の大きさの異なる流路を並べたデバイスの設計を行い、1000倍を超える静電容量変化率をもつキャパシタを実現することが可能であることを示した。続いて、フィルタ回路への応用を実証するために低域通過フィルタの試作を行い、49.4-672 MHz の広いカットオフ周波数帯域(13倍)が実現できることを実証した[3]。さらに、このキャパシタ内部の流体を駆動するために、EWOD (Electrowetting-on-Dielectric) 技術を利用して、直径 0.1 mm の水滴を狭い流路内で 15 V の電圧によって駆動できることも示した。このように、本提案のデバイスは、従来の MEMS デバイスと比較して、1) 著しく大きな静電容量可変率をもつ、2) 機械的な駆動部

を持たないために長期信頼性に優れる、という大きな特長をもち、従来技術で実現できる可変率を1桁以上超える革新的なものであった(特許成立)。

しかし、このキャパシタをフィルタ回路に適用するには、高周波化や微小液滴駆動制御のような解決しなければならない課題がいくつもあり、本研究によりこれら課題を解明することが重要であった。

- 1) T. Kawakubo, T. Nagano, M. Nishigaki, K. Abe and K. Itaya, "Piezoelectric RF MEMS tunable capacitor with 3 V operation using CMOS compatible materials and process," Tech. Dig., IEEE Int. Electron Devices Meeting, Washington, DC, USA, (2005)
- 2) H. Konishi, M. Nishiyama, J. Suzuki, Y. Tezuka, A. Komai, Y. Suzuki, and K. Suzuki, Dig. of The 14th Int. Conf. on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, Lyon, France, pp.447-450, 2007.
- 3) K. Fukuda, K. Kitamura, R. Kanda, H. Tanigawa, and K. Suzuki, "Low-Pass Filter with Fluid MEMS Variable Capacitor," Proceedings of the 26th Sensor Symposium, Tokyo, The Institute of Electrical Engineers of Japan, pp.111-115, Oct. 2009.

## 2. 研究の目的

流体搬送を利用した RF 可変キャパシタをさらに応用範囲が拡大する 30 GHz 以上のミリ波帯まで適用するには、流体高周波工学およびマイクロ流路工学に関連した数多くの課題が残されていた。このため、本研究では、これら課題の解明を目指し、以下の研究を行うことにした。

1) 純水の高周波電気特性が短時間(1時間)で急激に劣化することが判明した。実験データから、駆動電極材料との関連性が明らかになり、純水の電気化学的反応による劣化が強く示唆されていた。このため、本研究では微小液滴の電気特性劣化の原因解明を行うことにした。

2) 本研究までに数多くの流体の駆動研究が報告されていた。本研究開始までには、100  $\mu\text{m}$  ギャップの流路内を 100 nl 程度の液滴を電氣的駆動した報告が最小の液滴実験であった。しかし、この流路の実験結果を RF フィルタに適用するにはギャップならびに液量が大きすぎることが明らかであった。このため、本研究では、キャパシタ応用に適合させるために、非常に微小な(0.1 nl)液滴を 7  $\mu\text{m}$  ギャップの狭い流路内で EWOD 技術を利用して電気駆動させたときに発生する諸問題の解明を行うことにした。液滴が著しく微量であることから、流路側壁の摩擦等の影響が出現し、Young-Lippmann 方程式からはずれた液滴の振る舞いが予想された。さらに、側壁近傍に生じる電気二重層の影響が大きくなり、単純な EWOD 現象以外に電気

二重層の流れである electro-osmosis による力が増大すると思われた。

3) 本研究よりも前に我々が行った実験では MEMS キャパシタを評価用基板にハイブリッド実装したデバイスを用いた。このため、4 GHz 以上の高周波特性を十分に評価することができなかった。本研究では、流体可変キャパシタと RF 伝送路を集積化したモノリシック RF 可変キャパシタの開発を行い、30 GHz までの高周波特性を明らかにすることにした。これには、MEMS 加工技術の開発が必須であった。

### 3. 研究の方法

計画当初までに、100  $\mu\text{m}$  ギャップのマイクロ流路に対して 15 V のパルス波で 100 nl の水滴を駆動できることを実証した。また、1 GHz までの高周波特性のモデル化に成功し、80 倍の静電容量を変化させるキャパシタを試作してこれを確かめた。この成果を本研究の三年間で順次拡大発展させて最終目標（大可変 RF フィルタ）の基本実証に到達できるように研究を進行させていくことにした。以下に、年度ごとの目標を示す。

1) 初年度：50  $\mu\text{m}$  ギャップ、10 nl 液滴のマイクロ流路の特性解明と電気制御技術の構築（1 GHz）。

2) 第二年度：20  $\mu\text{m}$  ギャップ、1 nl 液滴のマイクロ流路技術と 30 GHz 流体高周波特性の解明。高周波特性評価用可変キャパシタの試作と評価。

3) 第三年度：7  $\mu\text{m}$  ギャップ、0.1 nl 液滴のマイクロ流路技術と大可変 RF フィルタの基本試作実証。

本研究の開始時に、実験を繰り返すと印加電圧の大きさや水滴の移動に大きなばらつきがあることが判明した。この原因として、a) 撥水膜の不均一、b) 駆動電圧の変動、c) 水滴の変質、が挙げられる。このため、これら不安定要因を取り除いたデバイスの改良を行い、ビデオカメラを含めた直接観察とリーク電流の周波数特性評価により、EWOD 現象を制御するパラメータを明らかにすることにした。具体的には以下の項目の検討を行うことにした。

・現在 SYTOP（旭ガラス）および EGC-1720（住友 3M）の二種類の撥水膜をスピン塗布および引き上げ装置により作製している。この方法を改良することにより撥水薄膜の均一化を実現することにした。

・溶液と電極との間の電圧が制御されていないために駆動電圧が安定しないと考えられた。このため、電気化学で用いられる標準電極を流路内に作製して溶液-電極間の界面電位を安定させることにした。

・100 nl 以下の微小な液滴はすぐに蒸発してしまうという問題がある。しかし、液滴の表面をシリコンオイルで被覆すると長時間の駆動試験に耐えられる。現在、我々の研究室では被覆した 500 nl の液滴を作製する

ことが可能であるが、これを改良して 0.1 nl の微小液滴を作製する装置の試作を行うことにした。この方法が開発されるまでは、水滴の変質を防ぐために密閉構造を用いて繰り返し長期信頼性試験を含めた基礎実験を行うことにした。

・ネットワークアナライザ測定および電流リーク測定を行い、流体および薄膜界面誘電率の周波数依存性と液滴の運動との関係を解明することにした。

・流体の誘電損失を電流リークのデータから解明することにした。

### 4. 研究成果

先に述べたように、本研究は、広帯域可変 RF-MEMS フィルタへの応用を目的に、可変キャパシタに純水を用いて誘電率を 80 倍も可変できる新たな原理による斬新な機構を研究開発するものである。これまで行ってきた研究の蓄積から、水の搬送によって 13 倍を超える大幅な周波数可変フィルタが実現できることは検証できており、この成果を発展させ、本研究では、30 GHz 以上の高い周波数帯域で利用することが可能なデバイス開発の道筋を開拓することを最終目標にする。

本研究の可変キャパシタを RF フィルタに应用するには、非常に微小な（0.1 nL）液滴を 7  $\mu\text{m}$  ギャップの狭い流路内で EWOD 技術を利用して電気駆動させたときに派生する諸問題を最初に解明する必要があった。駆動電極形状の最適的化を進めることによって本研究期間中に、1 nL の微小液滴をギャップ 10  $\mu\text{m}$  の流路内で移動させることに成功した（図 1：学会発表の文献[9]）。この際、150 V 程度の高い駆動電圧が必要とされたが、これは狭い流路では流路内部の摩擦による影響によって大きな駆動力を必要とするという機構が働くことを強く示唆するデータを得た。また、交流静電気力を用いることにより摩擦を軽減させることが可能であることを見出し、今回、75 Vrms まで駆動電圧を低減させることができた。

さらに、液滴の駆動方法の改良を行い、従来の EWOD 駆動法に比べて駆動電極の構成を著しく簡略化することが可能な液滴形状制御法の提案と実証を行った（学会発表の文献[8]）。

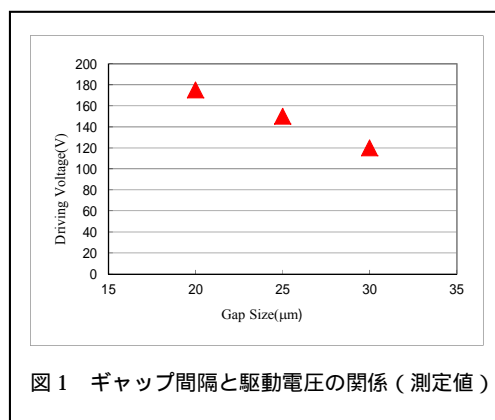


図 1 ギャップ間隔と駆動電圧の関係（測定値）

開発した流体可変キャパシタを使用した可変帯域除去フィルタ (BEF) の開発を行った。これは、1-10 GHz の周波数帯域に適用できるものであり、可変キャパシタに加えてインダクタも集積化して作製した (図 2)。

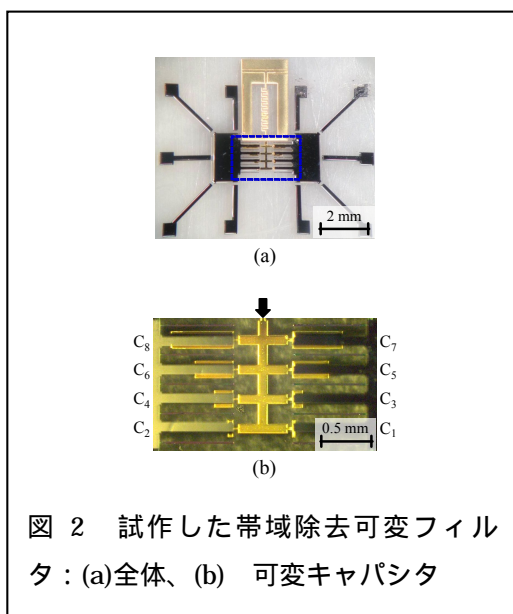


図 2 試作した帯域除去可変フィルタ : (a)全体、(b) 可変キャパシタ

可変キャパシタは  $20\ \mu\text{m}$  ギャップをもつ二つの平行電極の間に水を搬送するものであり、理論的に 80 倍の静電容量可変率 (CCR) をもっている。試作したデバイスでは、寄生容量の影響によって CCR が 31 に低下することがわかった。しかし、この高い周波数帯域では世界最高の CCR に相当する。この大きな可変率をもつ可変キャパシタを搭載した BEF は、簡略な構成であるにも関わらず、静電容量が増大するに従って中心周波数が 4.52 から 0.92 GHz まで変化した (図 3)。これは 4.9 倍のフィルタ中心周波数変化率をもつフィルタ特性であり、研究者の知る限り、世界最高の値である。

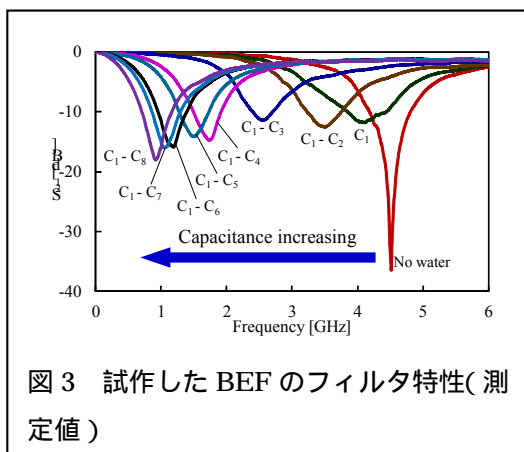


図 3 試作した BEF のフィルタ特性 (測定値)

この BEF フィルタの研究成果は、 $20\ \mu\text{m}$  という狭いギャップに水を搬送したこと、10 GHz という高い周波数において水を使用した可変キャパシタが正常に動作することを初

めて実証したことにおいて革新的なものである。また、この成果の実際的な応用実証に成功したことも十分に評価されるべきものである。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- 1) Y. Yamada, T. Yamanaka, T. Furutsuka, and K. Suzuki, "1-5 GHz Monolithic Multi-frequency-variable Band Elimination Filter Utilizing Fluid Microelectromechanical System Variable Capacitors," *Japanese Journal of Applied Physics*, (査読有) Vol. 53, pp.06JM04: 1-8, 2014.
- 2) K. Ishida, T. Furutsuka, and K. Suzuki, "Drift of Electrical Characteristics over Time for Fluid MEMS Capacitors," *IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines*, (査読有) Vol. 131, No. 11, pp.388-393, Nov. 2011.

〔学会発表〕(計 10 件)

- 1) 鈴木健一郎: ミリ波帯フェーズドアレイアンテナ (PAA) と高周波可変フィルタへの MEMS 技術の展開、IEEE AP-S Kansai Chapter 特別講演、立命館大学朱雀キャンパス、京都府、平成 26 年 4 月 17 日 (招待)。
- 2) T. Nishimura, Y. Yamada, Y. Furuno, T. Furutsuka, and K. Suzuki, "A widely frequency variable UHF bandpass filter with fluid MEMS capacitors," the 5th Integrated MEMS Symposium, Sendai International Center, Miyagi, Nov. 5, 2013.
- 3) Y. Morikawa, Y. Yamada, Y. Furuno, T. Furutsuka, and K. Suzuki, "A fluid MEMS switch utilizing droplet elongation," the 30th Sensor Symposium, Sendai International Center, Miyagi, Nov. 5, 2013.
- 4) Y. Yamada, T. Yamanaka, T. Furutsuka, and K. Suzuki, "2-6 GHz Monolithic Multi-frequency-variable Band Elimination Filter Utilizing Fluid Microelectromechanical System Variable Capacitors," 2013 International Microprocesses and Nanotechnology Conference, Royton Sapporo, Hokkaido, Nov. 5, 2013.
- 5) K. Suzuki, "MEMS Fluidic Variable Capacitor for the Application of Wide-Band GHz Filters," The 4th Int. Workshop on Material Issues for MEMS/MST Devices (IWMIMD), Shenyang, China, June 4, 2012 (invited).
- 6) Y. Yamada, T. Yamanaka, T. Furutsuka, and K. Suzuki, "SHF-band meander inductor with high Q-factor," the 4th Integrated MEMS Symposium, Kitakyushu International Center, Fukuoka, Oct. 22, 2012.
- 7) Y. Furuno, Y. Matsunami, T. Furutsuka, and K. Suzuki, "MEMS Variable Capacitor Utilizing Pulse Voltage Control for Droplet Elongation,"

the 29th Sensor Symposium, Kitakyushu International Center, Fukuoka, Oct. 22, 2012.

8) Y. Furuno, T. Yamanaka, and K. Suzuki, “Fluid Control for MEMS Variable Capacitance Based on Liquid Elongation,” the 28th Sensor Symposium, Tower Hole Funabori, Tokyo, Sep. 26, 2011.

9) Y. Matsunami, T. Yamanaka, and K. Suzuki, “EWOD Droplet Transportation in a Closed Channel with a 20  $\mu\text{m}$  Narrow Gap,” the 3rd Integrated MEMS Symposium, Tower Hole Funabori, Tokyo, Sep. 26, 2011.

10) 鈴木健一郎：「集積化 RF-MEMS が広げる新しいワイヤレス通信技術とユビキタス社会」、シンポジウム<エレクトロニクス材料とプロセス>（化学工学会 第 43 回秋季大会）、名古屋工業大学（愛知県）、平成 23 年 9 月 14 日（招待講演）。

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

出願状況（計 0 件）

取得状況（計 1 件）

名称：MEMS 可変キャパシタとそれを用いたフィルタ装置

発明者：鈴木健一郎

権利者：半導体理工学研究センター

種類：特許

番号：特許第 4855508 号

取得年月日：平成 23 年 11 月 4 日

国内外の別：国内外

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ritsumei.ac.jp/se/rm/micro/laboratory/suzuki.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

鈴木 健一郎 (SUZUKI KENICHIRO)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：70388122